

光载无线电核心技术研究进展

罗飏¹, 王任凡¹, 胡海², 李灯熬³, 赵菊敏³

1. 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430074
2. 深圳清华大学研究院, 深圳 518000
3. 太原理工大学信息工程学院, 太原 030024

摘要 光载无线(RoF)技术融合了微波射频技术和光子技术,充分体现了光通信“高速”和无线通信“移动”的技术特色,可大幅降低无线网络的能耗,代表了未来光网络和无线网络的发展方向。本文从RoF技术的国内外研究与应用现状出发,在分析RoF涉及的关键技术基础上,探讨了目前RoF技术面临的挑战,展望了其未来的发展方向。

关键词 光载无线电技术;探测器阵列芯片;激光器阵列芯片;宽频带光收发模块

宽带泛在信息接入已成为国家的重大需求,随着“宽带中国”、“智慧城市”等国家重大战略规划的推进,用户希望能在任意时间、任意地点享受到高速、可靠、无缝的通信,显然传统的移动通信网络已无法满足要求。在考虑上述国家需求的同时,能耗问题也是广泛关注的重点,目前运营商密集部署的无线基站由于是孤立的接入而不能有效处理潮汐效应的动态网络负载,导致大量电力的消耗,据统计,中国移动电力消耗在近5年内翻了一番。为了解决这些问题,人们开始关注融合了光纤通信技术和无线通信技术的光载无线(RoF)技术^[1],因为理论和初步应用显示RoF技术在低功耗宽带泛在信息接入方面存在优势,与传统的无线通信系统技术相比,RoF通信系统有着更广的蜂窝覆盖、更宽的带宽、较低的成本、较低的功耗和易安装等优点,充分体现了光通信的“高速”和无线通信的“移动”技术特色,而且可以大幅度降低无线网络的能耗,代表了未来光网络和无线网络的发展方向。在未来通信、军事上等诸多的领域有着非常重要的应用价值。

RoF技术为下一代宽带无线接入提供了很好的解决方案^[2],同时满足了对宽带和低能耗的追求。但目前基于RoF的高性能模拟激光器设计、探测器阵列芯片设计、低成本模块和系统封装技术等方面,中国距离其他国家还有一定的差距,单个高线性模拟直调激光器和探测器性能还远远落后于美国、日本等工业发达国家。在当前移动通信普通天线向阵列天线技术更新换代的关键时期,国内展开自主研发宽带模拟通信光收发阵列芯片和模块显得尤为紧迫。为此,本文综述RoF技术的研究与应用进展。

1 RoF技术的研究与应用现状

RoF技术是微波射频技术与光子技术交叉融合的典范,已经成为国内外研究的热点。美国DARPA近年来设立了“高线性光子射频前端技术”(PHOR-FRONT)、“光子型射频收发”(P-STAR)、“适于射频收发的光子技术”(TROPHY)等一系列与RoF相关的研究项目^[3];欧盟在FP6和FP7框架下,资助了包括“低成本光接入网技术

以及光无线融合技术”(ISIS)、“面向宽带无线接入的毫米波RoF系统关键器件和系统”(IPHOBAC)及“面向异构分布式可扩展无线体系结构和业务配路应用的光纤网络”(FUTON)等在内的RoF相关项目。在中国,国家重点基础研究发展计划(973计划)和国家高技术研究发展计划(863计划)项目近3年持续对RoF核心芯片、模块、系统和应用研究进行了资助。面对下一代信息网络的发展需求,适用于光纤无线融合通信光电子集成器件和模块化耦合封装技术的研究和应用现状如下^[4]。

1.1 高线性模拟激光器及阵列芯片

早在20世纪80年代,国外就开展了单个宽带、高线性模拟直调激光器的研究。随着通信容量的增加,系统对直调激光器^[5]的调制带宽和线性度的要求也一直在提高。目前调制带宽的增加与线性度的改善主要通过优化激光器结构实现,整体发展比较缓慢。对于调制带宽主要通过优化设计激光器的有源材料和整体结构,例如2009年美国桑迪亚国家实验室进一步在理论上分析了无隔离器情况下实现注入锁定的

收稿日期:2016-06-30;修回日期:2016-07-18

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2015AA016901)

作者简介:罗飏,高级工程师,研究方向为RoF芯片设计,电子邮箱:biao.luo@accelink.com;王任凡(通信作者),教授级高级工程师,研究方向为RoF芯片设计,电子邮箱:renfan.wang@accelink.com

引用格式:罗飏,王任凡,胡海,等.光载无线电核心技术研究进展[J].科技导报,2016,34(16):45-53;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.004

可行性,2011年该实验室报道了单片集成注入锁定 DBR 激光器,在没有光隔离器的情况下,通过制作 DBR 滤波器实现注入锁定,注入锁定后激光器 3 dB 调制带宽由 3 GHz 提高至 30 GHz。2011 年爱尔兰都柏林城市大学的 Browning 等将单片集成的注入锁定半导体激光器成功应用于正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)系统^[6],相同条件下,系统的误码率降低了 3 个数量级。虽然国外很多科研单位和研究人员在单个模拟直调激光器改善带宽和减小非线性都有广泛研究,但对于模拟直调半导体激光器等高性能多波长激光器阵列,目前国际上还没有相关报道。

中国模拟直调激光器的研究相对比较薄弱,2012 年中国科学院半导体研究所谢亮等实现了 24 GHz 的调制带宽,是目前国内公开报道的最大带宽值,其改进更多的是通过微波电路的补偿实现,在激光器芯片的结构和制造工艺的改进较少。对于注入锁定的单片集成、模拟直调等高端激光器,常用的掩埋式异质结(BH)波导结构制作工艺、材料生长和工艺水平等方面,国内与国外差距还较为明显^[7]。

1.2 大动态范围探测器及阵列芯片

对模拟光传输系统来说,高饱和功率光电探测的需求日益迫切,RoF 天线阵列需要接收高功率模拟信号,要求探测器有高线性度和高动态范围,这样可大大减小信号失真并且易于提高系统传输容量。近几年,国际上许多研究机构将探测器研究重点放在高饱和光功率探测上,采用各种方法试图获得具有更高饱和光功率和良好线性度的探测器。然而由于探测器^[8]中光生载流子的空间电荷效应,探测器在高饱和功率下遇到很大困难,是目前国际上尚未解决的一个关键物理研究和技术难点。2004 年美国德克萨斯大学设计的 PDA 光电二极管,部分耗尽吸收区光电探测器(PDA-PD)为了达到电荷平衡,在本征 i 区两侧加入 P 型掺杂和 N 型掺杂的吸收区。2005 年台湾大学设计研制的 InP 基近弹道 UTC-PD,近弹道(Near-

Ballistic)UTC-PD 在收集区插入一个附加的掺杂层,通过引入这一层,可以控制收集层的最大电场。然而每一种器件又都有一些弱点,例如,PDA-PD 中本征吸收层太薄会降低探测器的光电响应度。UTC-PD 中吸收层太厚会增加空穴的扩散时间,太薄影响响应度等,InP 基高功率探测器目前有许多问题尚未解决,仍处于研究探索阶段^[9]。

国内半导体光电探测器研究起步较早,在国家科技部和相关部门大力支持下,通过多年研究已经具备良好的基础,近年来中国科学院半导体研究所、清华大学、北京邮电大学等研究单位对高饱和功率线性响应探测器开展了较多的研究工作。中国科学院半导体研究所 2000—2010 年先后承担了两期“973 计划”项目,于 2012 年在前期研究基础上引入集成波导结构,进一步在集成波导高功率探测器研究中取得突破,探测器 3 dB 带宽达到 40 GHz^[10],线性响应光功率超过 30 mW,并将此种侧面入光的探测器结构用于发展二维探测集成芯片。2012 年,清华大学主持承担了“973 计划”项目“新型宽带大动态毫米波器件及应用中的微波光子学基础研究”,主要针对高饱和光功率光探测器进行研究。目前,国内高饱和功率线性响应探测器一些基础性研究已具有很好的研究基础,但与系统结合进入实际应用尚有许多关键的科学和技术问题需要解决,同时多路并行探测集成芯片研究方面处于起步阶段。总体来说,中国在高饱和功率线性响应探测器和光子集成芯片领域的水平落后于欧美和日本,需面向实际应用需求开展针对性深入研究,迅速提高中国的高速、高功率光电器件及集成芯片的产品应用水平。

1.3 多波长激光器阵列合波、探测器阵列分波

在多波长激光器阵列合波、探测器阵列分波方面^[11],国际上相关技术也发展迅速。2011 年日本电报电话公司(NTT)光子实验室将 4 通道激光器阵列合波输出,芯片尺寸 2 mm×2.6 mm,实现 4×25 Gbit/s 10 km 数字传输;激光器

阵列集成芯片代表 Infinera 公司采用 InP AWG 将 10 通道和 40 通道激光器阵列合波输出,分别实现 10×10 Gbit/s 和 40×40 Gbit/s 数字信号传输。其中,InP 基 AWG 与波导探测器单片集成芯片发展较早。2010 年 7 月,Intel 公司报道了四路波分复用器与 Ge/Si 波导探测器单片集成的 4×12.5 Gbit/s 接收芯片,其中波分复用器采用小尺寸的刻蚀衍射光栅同(EDG)。这些研究均为解复用器与数字探测器阵列集成,解复用器与模拟高饱和功率探测器阵列集成研究成果较少。

中国在多波长激光器阵列合波、探测器阵列分波方面的研究相对较早^[12]。自 1999 年以来,中国科学院半导体研究所、武汉光迅科技股份有限公司等长期从事阵列波导光栅(AWG)波分复用器的研究,设计制备出了硅基二氧化硅、InP 基、SOI 基 3 种类型的 AWG^[13],对 AWG 插入损耗、偏振相关损耗及串扰控制进行了深入研究,并且开展了小通道 AWG 与单管激光器、探测器的混合集成研究工作。武汉光迅科技股份有限公司建立了完善的平面光波回路(PLC)晶圆生产线,自主设计生产的 PLC 光分路器芯片已大规模投放市场,打破了国外垄断局面,有力支撑了中国光纤到户、三网融合宽带网络的建设。

1.4 RoF 光收发模块研制

RoF 光收发模块的研制起初集中在常规无线通信频段,用于光纤拉远直放站覆盖,涉及 GSM、CDMA 及 3G 的 CDMA2000、WCDMA、TD-SCDMA 等^[14]。随着通信频段扩展、电子战等需求的兴起,光收发模块的带宽相应地拓展到 18、26.5、60 GHz,甚至 250 GHz 等。目前,这些产品的模块化程度较高,相应的研制技术也逐渐被完善,国外很多公司相继推出了成熟的产品,如表 1 所示。

国内研究机构在数字光收发模块研发方面成果丰富,包括中国科学院半导体研究所、电子科技大学、清华大学、武汉烽火科技集团有限公司等单位,目前已经可达到数十 Gbit/s 的调制/解调

速率。相比于数字收发模块,模拟光收发模块在线性度、动态范围等指标上要求苛刻,国内相应研发工作尚处于起步阶段。中国科学院半导体研究所(项目重点参与单位)在宽带模拟光收发模块封装方面积累了丰富的经验,2012年研

发了18 GHz带宽的单信道模拟光收发模块^[5],无杂散动态范围达101 dB·Hz^{2/3}。同时在模拟直调激光器的制造工艺上,只有中国科学院半导体研究所、武汉烽火科技集团有限公司等几家单位具有10 GHz以上速率激光器自主研发能

力。其中,中国科学院半导体研究所在国防项目的支持下已经研制出模拟调制激光器模块,其带宽达到24 GHz,相对响度噪声RIN小于150 dB/Hz,并成功进行了产业化应用。

表1 国外研发的RoF光收发模块

Table 1 RoF optical transceiver module invented abroad

模块	工作波长/nm	频段/Hz	动态范围/dB	公司
3 GHz模拟链路光发送器	1310、1550	10 M~3 G	110	Finisar美国
3 GHz微波光收发器MP-2320	1310	1 M~3 G	—	MPS美国
Gbit/s模拟发送器AFBR-1310Z	1310	200 M~5.5 G	—	Avago美国
6 GHz模拟光收发器	1310、1550	50 M~6 G	106	Finisar美国
18 GHz微波光收发器MP-6000	1310、1550	500 M~18 G	—	MPS美国
18 GHz光发送器SCMT-10M18G-FA	1550	10 M~18 G	101	MITEQ美国
多通道宽带光收/发器592-BPH022	1550	500 M~18 G	—	Micreo澳大利亚
紧凑型宽带光收/发器UCT/UCR	1310、1550	5 M~26.5 G	—	MPS美国
宽带模拟光接收器APRV2000A	1550	57 ~6 5G	—	u2t德国

1.5 光纤无线融合通信的系统实验

2009年欧盟实施了BONE项目,其中光纤无线融合技术在室内无线接入的应用使用了载频位于3.1~10.6 GHz的MB OFDM和IR-UWB两种超宽带接入技术。2009年欧盟的另一个项目FUTON也探讨了光纤无线通信技术在4G移动通信中的应用^[16],其采用直接调制技术和反射式半导体光放大器实现了3.5 GHz载频上100 MHz信号带宽的传输。此外,60 GHz毫米波段的光纤无线融合通信技术也获得了广泛的关注,2010年法国电信开展了Teldot项目,该项目使用量子点锁模激光器实现16~32根光频梳以用于60 GHz毫米波的产生,并结合波分复用技术实现室内1~10 Gbit/s无线信号的覆盖。英国科研人员对传统基站结构也进行了优化研究,目的在于简化基站配置、降低系统成本,实现超高频毫米波段的全双工光纤无线融合系统。在保证下行链路传输性能的前提下,最充分有效地利用下行链路的载波作为上行链路重新利用,并且最大限度的简化基站配置^[17]。

在国内,2010年北京邮电大学设计了基于超连续谱多波长光源的OFDM-WDM型RoF系统,实现了光与无线业务的融合,包括1 Gbit/s的16QAM-OFDM与下行业务和1 Gbit/s的OOK上行业务,并提出一种WDM-RoF-PON^[18]组合方案,有效实现了10 Gbit/s光接入和2.5 Gbit/s无线接入,随后,北京邮电大学进一步实现了10 Gbit/s的16QAM-OFDM的光接入和32AQM-OFDM无线接入。上海交通大学研究团队利用单驱动MZM设计了一个双向RoF方案,产生了1.25 Gbit/s下行基带信号,20 GHz微波信号及40 GHz毫米波信号。国内的其他很多高校也看到了MIMO-RoF技术的发展潜力,陆续展开研究,包括接收灵敏度、信噪比的改善等。除了上述研究单位,国内还有北京大学、华中科技大学等高校也进行了相关研究。目前对于宽带模拟通信用光收发阵列芯片与模块的研究,国内有一定的科研基础。但在一些关键技术仍待加大投入,集中突破,以追赶国际先进水平,最终实现中国掌握自主知识产权的核心技术^[19]。

2 RoF涉及的关键技术

2.1 激光器阵列混合集成芯片

目前国内外常用的激光器阵列混合集成芯片主要有:基于纳米压印技术的4通道激光器阵列混合集成芯片和基于AlGaInAs/InP^[20]材料体系的4通道激光器阵列混合集成芯片。前者采取WDM技术,制作4通道1310 nm附近、通道间隔8 nm激光器及探测器阵列集成芯片,图1为二种集成芯片结构示意图。

采用4通道多波长激光器阵列与硅基二氧化硅AWG混合集成、探测器阵列与AWG单片集成的方案,其中主要涉及以下关键技术。

1) 激光器阵列芯片高的单模成品率实现。

DFB激光器要实现高的单模成品率必须要在光栅中间插入相移或者啁啾等非对称精细结构,以实现在光栅的禁带中建立一个有效的谐振模式。对于传统的 $\lambda/4$ 相移DFB激光器的制造,需要在光栅中间移动半个周期,一般在100 nm的量级,主要依赖电子束曝光技术,成本非常高。全息曝光制作光栅

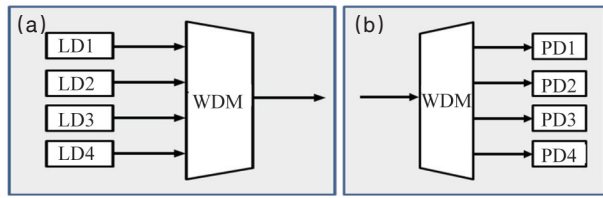


图1 激光器阵列(a)与探测器阵列(b)集成芯片结构
Fig. 1 Integrated chip structure of laser array (a) and detector array (b)

成本很低,但是只能制作均匀光栅,很难实现高的单模成品率。基于纳米压印技术的激光器可以等效实现非对称相移啁啾等复杂结构,利用特定设计的取样结构和均匀的光栅等效实现复杂精细光栅结构。一般取样结构的特征尺度在几微米,均匀光栅可以利用全息曝光实现。制造简单,在目前国内普通加工平台即可以实现,因此成本低廉,适合规模化的制造。

2) 阵列激光器波长的精确控制。

波长的准确控制是激光器阵列的非常重要的技术指标。普通制作DFB激光器是利用电子束曝光刻写每一个激光器的光栅条纹,控制光栅周期。但受电子束曝光的拼接误差及外界环境等影响,精度很难控制1 nm以内。纳米压印技术只需要控制每个激光器的取样周期,如图2所示。目前理论研究发现,基于纳米压印技术的激光器波长精度是普通制作方法的100倍,同时实验测试得到波长误差基本能控制在-0.20~0.20 nm。

3) 高线性度模拟直调激光器的实现。

高线性度模拟直调是激光器阵列混合集成芯片制作中的关键技术。模拟直调激光器高线性度主要有两个衡量特性:1 dB压缩点,激光器谐振非线性。

这里提出基于纳米压印技术的技术方案实现模拟直调DFB半导体激光器阵列的高线性度,具体实施如下。

(1) 1 dB压缩点。在传统的 $\lambda/4$ 相移DFB半导体激光器中,中间插入的 π 相移会导致光场在相移点积累,而形成比较严重的空间烧孔效应。新型

方案拟采用设计波导光栅结构,比如引入等效啁啾等方法调和空间烧孔效应,从而增加整个腔内载流子的利用率均匀性,实现高1 dB压缩点。

(2) 激光器谐振非线性抑制。影响DFB半导体激光器模拟直调激光器谐振非线性的主要来自于光子载流子的非线性复合。在多载波模拟调制时产生二阶谐波失真(2HD)、三阶谐波失真(3HD)、三阶互调失真(IMD3)及更高阶的非线性失真分量。在这些失真分量中,由于IMD3最靠近射频载波信号频率,一般无法用滤波器滤除,所以对模拟直调线性度的影响比较大。从目前的理论分析和实验结果来看,IMD3主要来自于两方面的因素:空间烧孔效应导致载流子符合的不均匀造成IMD3的增强作用,在低频段起主导作用;在高频波段弛豫振荡的影响起主要作用。对于载波频率达到X波段,接近弛豫振荡频率,所以弛豫振荡对非线性的影响比较大。

而基于AlGaInAs/InP材料体系的4通道激光器阵列混合集成芯片则通常从芯片材料体系设计、芯片结构设计、芯片工艺设计、特性测试及材料生长技术、工艺制作技术、芯片测试技术等方面依次设计和研究,以全面保证研制出的高线性大功率模拟激光器达到指标要求^[21]。

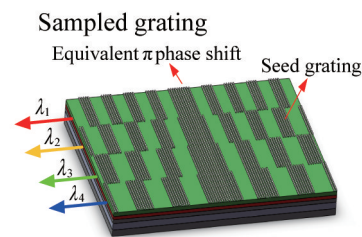


图2 采用纳米压印技术制作的DFB阵列激光器
Fig. 2 Schematic of DFB array lasers using nano-imprint technology

2.2 高饱和功率光探测器阵列芯片

研制高饱和功率光探测器阵列芯片需要从芯片材料体系设计、芯片结构设计、芯片工艺设计、特性测试及材料生长技术、工艺制作技术、芯片测试技术等方面依次设计和研究以达到芯片指标,其技术路线可采用正面进光的台面InGaAs/InP PD结构,主要研究高带宽高饱和的InGaAs/InP PD^[22]的结构设计、高可靠性的台面PD的制作工艺和高速PD的高频测试技术。具体通过3个步骤实现:1) 高速探测器的结构设计;2) 工艺技术设计;3) 饱和模拟探测器测试技术及方法研究。

其他光探测器阵列芯片研究技术路线包括:

1) 利用自行编制的模拟软件与商业软件相结合,模拟计算探测器在高功率及各种结构下的光学和电学参数,研究高功率探测器空间电荷效应和屏蔽效应的抑制^[23]。

2) 在对物理机制进行研究和了解的基础上,拟采用集成波导结合单载流子传输探测器结构,将光传输吸收与载流子输运有效分离,解除带宽与响应度之间的制约关系和载流子堆积产生的空间电荷屏蔽效应;从速率、饱和功率、线性度等关键因素,以及多路探测器阵列光学、电学可集成性方面提出集成芯片结构和集成方法。

3) 探测器高频电极设计和制作。对高速波导探测器,其信号频率已进入微波领域,其相位失真、反射损耗、传输损耗需要仔细考虑和精心设计。如果相互间连线阻抗不匹配,将产生很大的波反射。要传输这种信号,必须采用微波传输线。拟采用共面波导电极结构,该结构工艺简单、损耗较小、屏蔽良好、波速色散较小,具有结构兼容、材料兼容和阻抗匹配等特点。

4) 采用4通道InP基AWG与波导型探测器阵列单片集成。为了减小InP AWG的尺寸,并实现偏振无关,采用深刻蚀脊型波导结构;为减小波导宽度波动造成的随机串扰,选择1.05低Q值GaInAsP^[24],对应组分 $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$

($y=2.197x$), 其中 $y=0.245$, $x=0.1115$, 在偏振无关条件下, 波导宽度 2.5 mm。为避免后续工艺影响, 刻蚀后生长 0.5 mm SiO_2 保护层。AWG 波导芯层与探测器阵列耦合稀释波导共享, 不存在 Butt-Joint 对接损耗。

2.3 基于宽频带光收发模块与系统验证

2.3.1 高线性直调多波长激光器阵列芯片硅基平面耦合封装

为实现单纤双向的宽频带光载无线接入网, 需研究多波长 DFB 激光器阵列芯片与硅基波分复用芯片、硅基波分复用芯片与输出光纤之间的高效耦合方式, 具体芯片耦合封装架构如图 3 所示。其中高线性多波长 DFB^[25] 激光器阵列基于前期研究成果, 拟在硅基芯片上 Bonding 4 个波长间隔为 20 nm 的 DFB 激光器 (满足 CWDM 应用需要), 通过独立波长锁定控制模块获得稳定 4 波长调制信号输出, 并直接经过光波导高效耦合到硅基波分复用器以实现单纤传输。

2.3.2 多制式宽频带光载无线传输与分配

多制式宽频带光载无线传输^[26]与分配技术的核心问题有 3 点: 1) 中心站-基站 (或 RAU, 下文类似, 不再重复

说明) 的架构; 2) 多收多发光模块的定向覆盖; 3) 不同应用场景收发功率大范围动态调整, 其中 RAU 常采用的架构方式是: 基站与中心站之间通过长距离光纤连接, 进行全双工通信 (图 4), 在波分复用方式下基于四收四发光模块构成多收多发天线系统。

多收多发光模块的定向覆盖: 基于四收四发实施定向覆盖, 以高指向性增强天线增益, 降低发射功率和功耗。覆盖方式可以采用全向协同 (适用于现有无线系统的分布化) 或者半向协同 (适用于带状拓扑结构), 如图 5 所示。

不同应用场景收发功率大范围动态调整: 结合收发模块的大动态范围以及链路的高线性传输, 使得在高密度多信号 (多频道、多制式、高速率) 共存、多种场景 (不同传输距离、不同移动性、不同气候及地理环境等) 交融等情形^[27], 能够大幅度调控 RoF 系统的收发功率, 如图 6 所示。

2.3.3 面向 4G 的宽频带光收发模块系统验证与演示应用

为了验证设计的宽频带高性能光收发模块, 搭建如图 7 所示的光纤无线融合系统验证平台, 此系统由局端集中式基站、光纤分配链路和远端光纤射频单元 3 部分组成, 远端光纤射频单元包

括天线和射频光电收发组件, 各远端光纤射频单元与局端基站之间的射频数据传输通过光纤分配链路完成, 局端基站负责信号的集中处理。这样不仅能有效地避免传统无线通信射频信号在空间传输和分配过程中产生的损耗和干扰, 而且光纤分配链路对数据格式透明, 很容易实现多制式无线网络 (2G、2.5G、3G、4G/LTE) 的异构融合^[28], 大幅降低了系统扩展的复杂性。宏观上, 光纤无线融合接入网络如同由局端基站与多个远端光纤射频单元构成的微微蜂窝网或毫微微蜂窝网。由于每一个远端光纤射频单元只需覆盖很小区域, 因此无线发射功率可以很小, 降低了电磁辐射对人体健康的影响; 又由于局端基站可以在远端光纤射频单元无接入业务流量时降低发射功率, 从而达到有效节能。因此, 光纤无线融合接入网络具有灵活、宽带、异构兼容特点, 充分体现了光纤通信的“高速”和无线通信的“移动”技术特色, 而且可以大幅度降低无线网络的能耗, 实现“绿色健康”通信, 代表了未来光网络与无线网络的发展方向^[29]。

3 中国 RoF 技术发展面临的挑战与发展方向

虽然 RoF 技术在低功耗宽带泛在信息接入方面存在优势, 但目前国内光载无线分布式系统成本仍然很高, 采用的还是国外商用的分立式光收发组件、宽带放大器和线性驱动器等, 而分立式模拟激光器探测器芯片、微波光电模块无法满足系统低成本和低能耗的要求, 亟待技术突破。以光电子与微电子融合为特征的新型射频光电子集成芯片和模块将会是未来 RoF 系统的核心技术。与常规光纤通信光电子器件显著不同的是: 射频光电子器件要求适应多种制式无线网络的多载频、高线性需求, 而且接入速率要求达到 1~10 Gbit/s 高带宽视频及无压缩高清健康医疗信息获取等场景中还需要超高载频, 这些对于新型光电子器件的设计理论及其低成本的高集成技术都是全新的挑战,

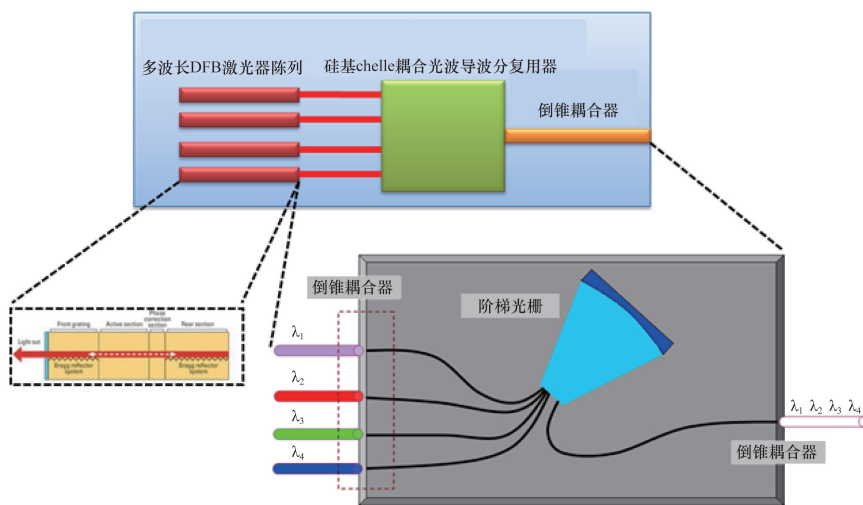


图3 高线性直调多波长激光器阵列芯片硅基光耦合架构

Fig. 3 Silicon-based optical coupling structure of high linear straight adjustable multiple wavelength laser array chip

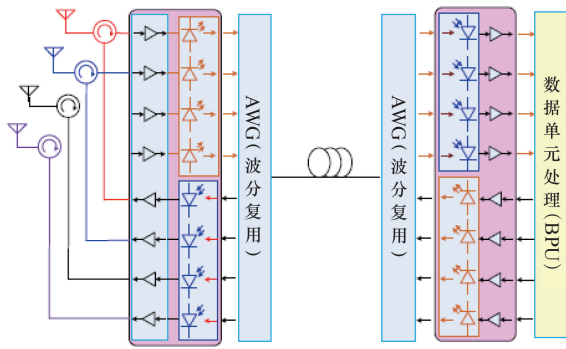


图4 RAU架构

Fig. 4 Structure of RAU

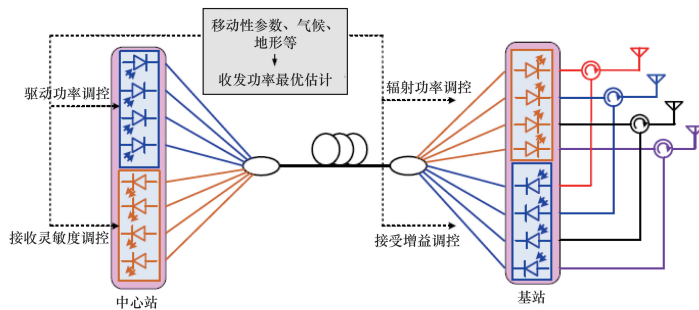


图6 不同应用场景收发功率的大范围动态调整

Fig. 6 Wide dynamic range adjustment of transceiver power in different application scenarios

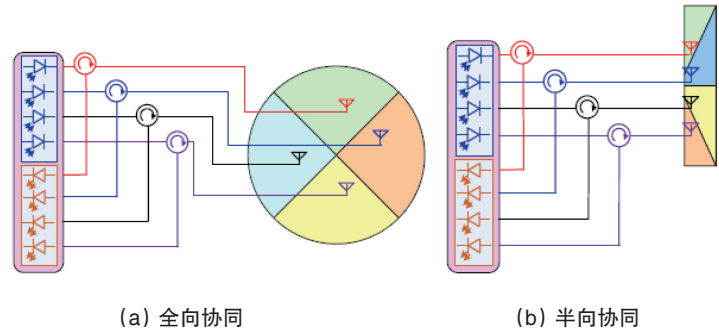


图5 四收四发光模块的定向覆盖模式

Fig. 5 Directional cover patterns of four transmit-receiveoptical module

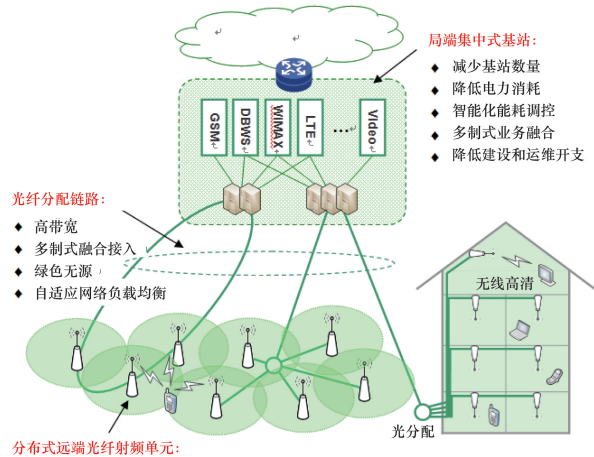


图7 面向4G的宽频带光收发模块系统验证与演示系统

Fig. 7 Validation and demonstration diagram of broadband optical transceiver module for 4G

集中表现在高线性激光器与光探测器阵列芯片制备和宽频带光收发模块与系统验证两大方面^[30]。

3.1 高线性激光器与光探测器阵列芯片的研究与制备

在RoF系统中,由于光载波上承载的是模拟的微波信号,与传统的数字光纤传输链路相比,其系统对光器件的性能以及链路自身的色散、非线性效应、噪声等都有了更为苛刻的要求。然而,当前用于RoF的高线性模拟直调激光器和探测器还比较昂贵,性能还有待提高。国内关于RoF技术的研究始于2002年的FuTURE计划^[31],目前,国内很多高校和研究院所在RoF的研究方向表现较为出众,有多项试验成果,但还缺乏应用于RoF的高速模拟激光器和探测器阵列芯片方面的研究,比如单

个高线性模拟直调激光器和探测器性能还远远落后于美国、日本等发达国家。在当前移动通信的普通天线向阵列天线发展的技术更新换代的关键时期,自主研发高性能模拟直调激光器和探测器阵列以及模块是中国RoF技术发展面临的巨大挑战。

虽然中国在高线性激光器与光探测器阵列芯片的研究与制备方面基础比较薄弱,但这一方面未来的发展方向已经明确,高速模拟直调激光器阵列芯片及高饱和功率探测器阵列芯片是RoF中的核心芯片,其设计及制备是中国下一代网络核心技术,也是亟需解决的一大技术难题。

3.2 宽频带光收发模块与系统的验证

3.2.1 高性能光收发阵列芯片平面光耦合

为了适应包含2G、2.5G、3G、4G/LTE^[32]等各种通信制式的载频涵盖0.9、1.8、2.1、2.4、2.5、2.6及3.3~10.6 GHz,要求研究的RoF光电子芯片必须具备多载频特性。而RoF光电子芯片还需要应对长距离、高带宽的模拟传输,这也对光电子芯片的高线性和大动态范围响应特性提出了苛刻的要求。同时,为了进一步降低系统运行维护成本,基于单纤双向的光分配网络结构一直是运营商们的首选^[33],这也意味着必须解决高线性、大动态范围、宽载频光收发阵列芯片与波分复用器及输入/出光纤的高效光耦合问题,否则会导致较大的光损耗和光反射,而所引入的光反射会使RoF光电子阵列芯片的工作状态发生改变,如出现阈值变化、功率抖动和相位噪声,急剧恶化阵列芯片高频性

能^[34]。

因此,为了应对多载频、高线性、大动态范围和高效光耦合的重大挑战,需要研究高速光电子集成芯片内部微波与光波、光波与光波、微波与微波的相互作用机理。包括高速低功耗微波调制机制,芯片内部非线性效应对光谱和频谱特性的影响,激光模式间的相互耦合对激光模式的稳定性和高频响应特性的作用,多信道微波信号的交叉串扰和信号完整性问题。研究基于硅基波分复用技术的低成本平面耦合封装集成技术,在缩小RoF光电子阵列芯片尺寸的同时减小封装引入的光损耗和光反射^[35]。

3.2.2 高效阵列芯片模块化微波和系统封装

据Intel统计,光电子集成器^[36]件总体成本中,芯片设计、封装和测试各占1/3,故为了降低集成器件成本,必须在芯片设计初期就开始考虑耦合、微波封装的方式,也只有这样才能将光电子芯片的性能充分发挥出来,将封装寄生参数的影响降到最低^[37]。虽然对于低速光电子器件,可以借助微电子器件发展起来的封装技术,但对于RoF光电子阵列芯片这种宽带光电子器件,其内部芯片特征尺寸不断减小、通道数量不断增多、线性范围不断扩大,且其外部封装还需要承担一部分系统集成的工作,因此封装结构更加复杂。封装过程中因光电器件的工艺、材料、结构不一样,由此导致的组装工序繁多、工艺难度增大、阻抗模场失配以及热量损耗严重等问题,极大地限制了器件性能,也使得高性能光收发模块的设计及实现面临重大挑战^[38]。除此之外,为了降低远端基站的复杂度并进一步降低系统运维成本,支持热插拔的小型化光收发模块一体化设

计也势在必行,这也为系统封装带来了挑战。

因此,需要研究模块化封装中阻抗严重失配和由尺寸差异引起的模场失配对RoF光电子芯片性能的影响;搭建小信号模型分析寄生参数对RoF光电子芯片高频特性的影响规律^[39];研究利用电设计、热管理和可靠性分析三位一体的软硬件协同设计方法,解决信号、电源完整性问题,降低封装热阻;研究系统封装中信号回路的电流分布及趋势对整体结构的功耗和温度分布的影响规律,实现宽频带光收发一体化模块的高效微波封装和系统封装。

3.2.3 多制式宽频带光载无线传输与分配

考虑到中国现阶段处于多种移动通信系统将长期共存的事实,为了提供更具有针对性的服务,所设计的RoF光电子集成芯片和器件必须适应“2G、3G、4G、WLAN”^[40]四网协同发展的战略要求,这也给多制式宽频带光载无线光电子集成芯片提出了更高的要求。此外,多制式宽频带光载无线传输与分配网还需作为公共接入平台支撑移动通信网络的微微或毫微微蜂窝化^[41]、支撑超高载频超高带宽的高清多媒体业务无线覆盖的网格化和移动化,而在不同的应用场景下,不同的用户会对频谱带宽产生不同需求,故高效分配频谱资源以减小频带浪费成为了节省成本和能耗的有利工具^[42]。除此以外,这种采用微微或毫微微蜂窝的移动网络,其相邻小区的同频干扰也异常严重,如何通过功率分配技术实现无干扰接入也将是重大挑战。因此,针对室外蜂窝网络广覆盖的关键需求,需研究利用波分复用技术和无线多入多出(MIMO)技术提升频谱利用

率和接入速率;建立新型RoF物理层端到端传输性能理论模型作为系统调控和优化的理论支撑^[43];研究基于软件自定义的方式根据不同用户需求合理分配频谱和带宽,并结合数字信号处理技术提升器件灵敏度和非线性容忍度;探索多制式兼容和分配技术,实现不同场景下的无线接入并通过同频载波的功率分配技术降低干扰。

4 结论

新型RoF系统通过采用高频载波增加无线接入的带宽,利用多载频兼容现有各种无线通信格式,利用新型集成光电子器件实现低功耗毫微微蜂窝无线组网,这些特点完全符合国内外光纤无线融合通信研究的发展趋势,所以RoF技术是目前国内外通信领域内的一项重要技术,决定了未来移动通信和光线通信的发展进程,中国在RoF领域有一定的研究基础,也面临着重大发展需求和机遇。

面对新的国际研究形势,中国要积极应对RoF技术发展中遇到的挑战和困难,攻克关键技术和难点,迅速占领该研究领域的制高点,以更强的责任心与使命感,更加自觉、坚定地把科技进步作为经济社会发展的首要推动力量,为推动中国发展能源集约型的下一代信息通信产业起到引领和支撑作用。

参考文献(References)

- [1] Matsui Y, Murai H, Arahira S, et al. 30 GHz Bandwidth 1.55 μm strain-compensated InGaAlAs-InGaAsP MQW laser[J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 1997, 9(1): 25-27.
- [2] Matsui Y, H Murai, S Arahira, et al. Enhanced modulation bandwidth for strain-compensated InGaAlAs-InGaAsP MQW lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(10): 1970-1978.

- [3] Kobayashi W, Ito T, Yamanaka T, et al. 50 Gb/s direct modulation of 1.3 μm InGaAlAs-based DFB laser with ridge waveguide[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1500908.
- [4] Yamada H, Okuda T, Torikai T. Distributed-feedback laser with improved analog modulation distortion characteristics and method for fabricating the same: US 5394429[P]. 1995-02-28.
- [5] Okuda T, Yamada H, Torikai T, et al. Novel partially corrugated waveguide laser diode with low modulation distortion characteristics for subcarrier multiplexing[J]. Electronics Letters, 1994, 30(11): 862-863.
- [6] Childs R B, O'Byrne V A. Predistortion linearization of directly modulated DFB lasers and external modulators for AM video transmission[C]// Optical Fiber Communication Conference. San Francisco: Optical Society of America, 1990. Doi:10.1364/OFC.1990.WH6.
- [7] Meng X J, Tai C, Wu M C. Improved intrinsic dynamic distortions in directly modulated semiconductor lasers by optical injection locking[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1999, 47(7): 1172-1176.
- [8] Jung T, Sung H K, Wu M C, et al. Demonstration of monolithic optical injection locking using a two section DFB laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. Baltimore: IEEE, 2003: 295-296.
- [9] Lau E K, Zhao X, Sung H K, et al. Strong optical injection-locked semiconductor lasers demonstrating > 100 GHz resonance frequencies and 80 GHz intrinsic bandwidths[J]. Optics Express, 2008, 16(9): 6609-18.
- [10] Chow W W, Yang Z S, Vawter G A, et al. Modulation Response improvement with isolator-free injection-locking[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(13): 839-841.
- [11] Tauke-Pedretti A, Vawter G A, Skogen E J, et al. Mutual injection locking of monolithically integrated coupled-cavity DBR lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(13): 908-910.
- [12] Browning C, Shi K, Latkowski S, et al. Performance improvement of 10 Gb/s direct modulation OFDM by optical injection using monolithically integrated discrete mode lasers[J]. Optics Express, 2011, 19(26): 289-94.
- [13] Xie L, Man J W, Wang B J, et al. 24 GHz directly modulated DFB laser modules for analog applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(24): 407-409.
- [14] Tsuzuki K, Shibata Y, Kikuchi N, et al. Full C-Band tunable DFB laser array copackaged with InP mach-zehnder modulator for dwdm optical communication systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(3): 521-527.
- [15] Welch D F, Dominic V G, Kish F A, et al. Photonic integrated circuit (PIC) chips: US 7519246 B2[P]. 2009-04-14.
- [16] Wang L A, Lo Y H, Gozdz A S, et al. Integrated four-wavelength DFB laser array with 10 Gb/s speed and 5 nm continuous tuning range[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(4): 318-320.
- [17] Hillmer H, Klepser B. Low-cost edge-emitting DFB laser arrays for DWDM communication systems implemented by bent and tilted waveguides[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(10): 1377-1383.
- [18] Ryu S W, Kim J H. Multi-wavelength semiconductor laser array and method for fabricating the same: US 6594298 B2[P]. 2003-07-15.
- [19] Mazed M A. Techniques for fabricating and packaging multi-wavelength semiconductor laser array devices (chips) and their applications in system architectures: US 6411642[P]. 2002-06-25.
- [20] Li J, Wang H, Chen X, et al. Experimental demonstration of distributed feedback semiconductor lasers based on reconstruction-equivalent-chirp technology. Optics Express, 2009, 17(7): 5240-5245.
- [21] Zhao J, Chen X, Zhou N, et al. Experimental demonstration of a 16-channel DFB laser array based on nanoimprint technology[J]. Semiconductor Science & Technology, 2013, 28(5): 50-51.
- [22] Zhang C, Liang S, Zhu H, et al. A modified SAG technique for the fabrication of DWDM DFB laser arrays with highly uniform wavelength spacings[J]. Optics Express, 2012, 20(28): 29620-29625.
- [23] 陈向飞. 基于重构-等效啁啾技术制备半导体激光器的方法及装置: 101034788 A[P]. 2007-09-12.
Chen Xiangfei. The reconstruction method of equivalent chirp technology and its organs cup semiconductor device based on: 101034788 A[P]. 2007-09-12.
- [24] Chen X. Distributed feedback semiconductor laser based on reconstruction-equivalent-chirp technology and the manufacture method of the same: US 7873089 B2[P]. 2011-01-18
- [25] Shi Y, Chen X, Zhou Y, et al. Experimental demonstration of eight-wavelength distributed feedback semiconductor laser array using equivalent phase shift. Optics Letters, 2012, 37(16): 3315-3317.
- [26] Shi Y, Chen X, Zhou Y, et al. Experimental demonstration of the three phase shifted DFB semiconductor laser based on Reconstruction-Equivalent-Chirp technique[J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17374-17379.
- [27] Ito H, Kodama S, Muramoto Y, et al. High-speed and high-output InP-InGaAs untraveling-carrier photodiodes[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(4): 709-727.
- [28] Williams K J, Tulchinsky D A, Campbell J C. High-power photodiodes[C]//IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics. Victoria, BC: IEEE, 2007: 50-51.
- [29] Tulchinsky D A, Li X, Li N, et al. High-saturation current wide-bandwidth photodetectors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(4): 702-708.
- [30] Shi J W, Wu Y S, Hsieh S H, et al. High-power and high-responsivity photodiode for long-haul and short-reach fiber communication[C]//SPIE Proceedings Vol. 6013: Optoelectronic Devices: Physics, Fabrication, and Application II. Boston, MA: SPIE, 2005. Doi: 10.1117/12.632404.
- [31] Li Z, Pan H P, Chen H, et al. High-saturation-current modified uni-traveling-carrier photodiode with cliff layer[J]. IEEE Journal of Quantum

- Electronics, 2010, 46(5): 626–632.
- [32] Shi J W, Kuo F M, Bowers J E. Design and analysis of ultra-high-speed near-ballistic uni-traveling-carrier photodiodes under a 50 Ω load for high-power performance[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(7): 533–535.
- [33] Chtioui M, Lelarge F, Enard A, et al. High responsivity and high power UTC and MUTC GaInAs-InP photodiodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(4): 318–320.
- [34] Cole C, Huebner B, Johnson J. Photonic integration for high-volume, low-cost applications[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(3): S16–S22.
- [35] Kanazawa S, Fujisawa T, Ohki A, et al. A compact EADFB laser array module for a future 100 Gb/s ethernet transceiver[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(5): 1191–1197.
- [36] Man J W, Qi X Q, Xie L, et al. High bandwidth optical transceiver module for analog optical link in Ku band[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(3): 212–214.
- [37] Xie L, Man J W, Wang B J, et al. 24 GHz directly modulated DFB laser modules for analog applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(24): 407–409.
- [38] Medeiros M C R, Avó R, Laurêncio P, et al. RoFnet – reconfigurable radio over fiber network architecture overview[J]. Journal of Telecommunications & Information Technology, 2009.
- [39] Parker M C, Walker S D, Llorente R, et al. Radio-over-fibre technologies arising from the building the future optical network in Europe (BONE) project [J]. Optoelectronics Lett, 2010, 4(6): 247–259.
- [40] Wake D, Nkansah A, Gomes N J. Radio over fiber link design for next generation wireless systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(16): 2456–2464.
- [41] Zou Q, Merghem K, Azouigui S, et al. Feedback-resistant p-type doped InAs/InP quantum-dash distributed feedback lasers for isolator-free 10 Gb/s transmission at 1.55 μm [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(23): 231115–231115–3.
- [42] Gutierrez F Jr, Parrish K, Rappaport T S. On-chip integrated antenna structures in CMOS for 60 GHz WPAN systems[C]//Proceedings of the 28th IEEE conference on Global telecommunications. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 3285–3291.
- [43] Ng'oma A, Sauer M, Annunziata F, et al. Simple multi-Gbps 60 GHz radio-over-fiber links employing optical and electrical data up-conversion and feed-forward equalization[C]//Optical Fiber Communication – Includes Post Deadline Papers, 2009. San Diego, CA: IEEE, 2009: 1–3.

Review of RoF core technologies

LUO Biao¹, WANG Renfan¹, HU Hai², LI Deng'ao³, ZHAO Jumin³

1. Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan 430074, China

2. Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518000, China

3. Taiyuan University of Technology, College of Information Engineering, Taiyuan 030024, China

Abstract RoF(radio-over-fiber) technology combines microwave radiofrequency technology with photonics technology, and simultaneously embodies the technical features of “high speed” of optical communication and “mobility” of wireless communication. It greatly reduces the energy consumption of wireless network, representing the future development direction of optical networks and wireless networks. This paper begins with the domestic and foreign state of the RoF technology research and application, then focuses on the challenges that the ROF technology currently faces, and finally gives its future R/D direction on the basis of investigation of ROF key technologies.

Keywords RoF technology; laser array chips; detector array chips; broadband optical transceiver module

(责任编辑 刘志远)